

Стельмах А.У.Национальный авиационный университет,
г. Киев, Украина**АДГЕЗИОННО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ
И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ. СООБЩЕНИЕ I.
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА
ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ ТРЕНИИ
В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ****Введение**

Одной из актуальных проблем современной трибологии является повышение работоспособности трибосистем с граничным трением. Значимость этой проблемы возрастает, если учесть, что потери, связанные с изнашиванием узлов трения, составляют до 5 % ВВП промышленно-развитых стран. Развитие этого направления сдерживается недостаточностью знаний о сложных физико-химических, физико-механических и динамических процессах, протекающих при трении в условиях высоких нагрузочно-скоростных параметров в трибосистеме «твердое тело - смазочная среда - твердое тело».

Существует два основных взаимоисключающих подхода к решению проблемы граничного трения. Первый, ЭГД (эластогидродинамический) подход, основан на динамических процессах в тонком смазочном слое, в котором возникает избыточное давление, отождествляемое с контактными напряжениями в рабочих поверхностях, хотя трибоконтакт имеет три характерные области по направлению движения: сужающаяся или конфузурная область (КО), переходная область (ПО) и расширяющаяся или диффузорная область (ДО). При этом смазочная среда рассматривается, как ньютоновская однородная жидкость. Этот подход разработан О. Рейнольдсом, Н.П. Петровым, А.И. Петрусевичем и др. [1 - 4] в основном на уровне теоретических описаний, которыми предусматривается безызносность ЭГД-контакта, что противоречит эксперименту. При этом адгезионно-деформационные взаимодействия между поверхностями не рассматриваются. Однако в рамках этого подхода обнаружены кавитация [5] и термоэффект [6] в смазочных слоях, подтверждающие наличие в них динамических процессов.

Второй подход, основанный на адгезионно-деформационной теории граничной смазки, является признанным в современной трибологии, экспериментально подтвержденным и развит в работах Крагельского И.В., Боудена и др. [7, 8], а также отечественным ученым Костецким Б.И. и его школой (Голого Н.Л., Аксенов А.Ф., Шевеля В.В., Запорожец В.В., Дмитриченко Н.Ф. и др.) [9 ... 12]. В рамках этого подхода граничный слой рассматривается, как «третье тело», в котором давление, отождествляемое с герцевскими контактными напряжениями, всегда выше давления окружающей среды. При этом какие-либо динамические процессы в граничном слое не учитываются, что не позволяет объяснить наличие в нем кавитации и термоэффекта, описать кинетику адгезионно-деформационного взаимодействия поверхностей, определить условия и области его локализации, обосновать механизм образования и распределения продуктов изнашивания в контактной области и другие эффекты. Это ограничивает установление взаимосвязи неоднозначных сложных динамических процессов в граничных слоях с адгезионно-деформационным взаимодействием поверхностей, что не позволяет управлять трибологическим поведением трибоконтакта. В данной работе предлагается третий подход к рассматриваемой проблеме [13], основанный на адгезионно-деформационном взаимодействии поверхностей в его взаимосвязи с динамическими процессами в граничном слое. Для установления такой взаимосвязи необходимо было провести систематические комплексные исследования как закономерностей динамических процессов в граничном слое, так и адгезионно-деформационного взаимодействия поверхностей совместно с трибологическим поведением контакта, что и явилось целью настоящей работы.

Методика и материалы

Исследование процессов трения в условиях граничной смазки потребовало использования специального оборудования, которое было разработано и изготовлено в лаборатории нанотриботехнологий НАУ. Физическое моделирование радиального подшипника скольжения осуществлялось на специально разработанном и изготовленном приборе трения скольжения с линейным контактом АСК-01 [14], где модель подшипника реализовывала плоская поверхность неподвижного образца (рис. 1, а), а модель вала - образец в виде цилиндрического ролика (диаметр – 33 мм, ширина рабочей поверхности образующей, т.е. длина модельного подшипника – 3 мм). Сталь ШХ-15, HRC 59 ... 63. В приборе АСК-01 (рис. 1, б) обеспечивается постоянство линейного мгновенного контакта и равномерность распределения контактных напряжений благодаря использованию системы самоустанавливания контакта (рис. 1, а). Это достигнуто тем, что оси вращения модельного подшипника OZ и OX пересекают ось вращения модельного вала OZ в его центре масс по оси действия осевой нагрузки OY . Для обеспечения корректности трибологических исследований использовался разработанный и изготовленный лазерный сканирующий диффе-

ренциально-фазовый микроскоп-профилометр ЛСДФМП с чувствительностью по профилю 1нм [15], а также растровый электронный микроскоп РЭМ-10БИ.

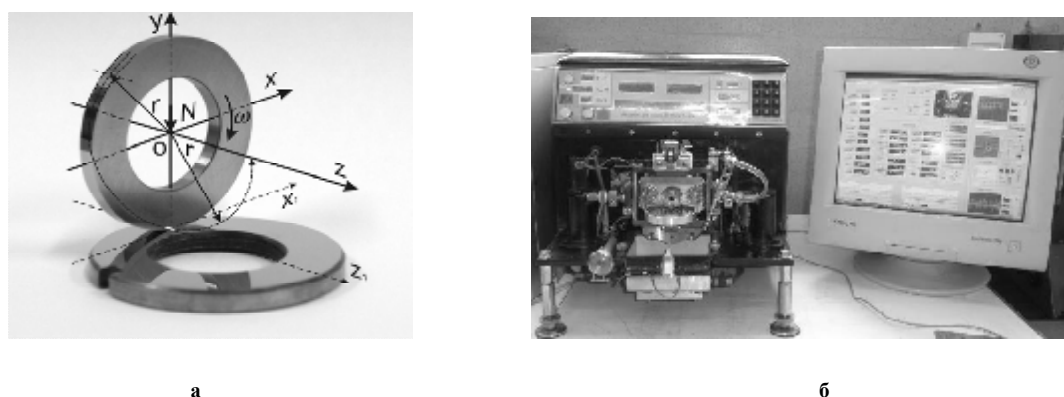


Рис. 1 – Внешний вид машины трения АСК-01 (а) и схема модельной трибосистемы скольжения с постоянным мгновенным линейным контактом (б)

В качестве смазки использовали горюче-смазочные материалы различных классов: авиакеросины (ТС-1, РТ), моторные минеральные (МС-20, ГАЛОЛ М-4042, МК-8) синтетические масла (диалкилбензолное, ИПМ-10) вакуумные масла (ВМ-6, ВМ-4), гидравлические масла (АМГ-10, ИГП 18), холодильное масло ХФ 12-16 и др. Трибологические испытания проводились в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров. Начальные контактные напряжения создавались для низкомолекулярных углеводородных сред - 1000 МПа, а для масел от 2000 до 2500 МПа. Линейная скорость скольжения варьировалась от 0,04 м/с до 2м/с. Шероховатость рабочих поверхностей модельных вала и плоского подшипника создавалась путем их последовательного полирования алмазными пастами до уровня параметра $Ra < 20$ нм, что контролировалось ЛСДФМП. Измерения профилей износа дорожек трения производились контактным профилографом-профилометром «Калибр М201» и бесконтактным ЛСДФМП.

Результаты исследований и обсуждение

На рис. 2 ... 4 представлены экспериментальные закономерности процесса изнашивания, адгезионного взаимодействия поверхностей и распределение продуктов износа после трения симметричной системы, которые не имеют однозначного объяснения с позиций известных теорий трибологии. Однако они могут быть описаны с позиций упорядоченных микротечений упругодеформированных граничных слоев смазки, обуславливающих градиенты давлений в конфузурной и диффузурной областях трибоконтакта.

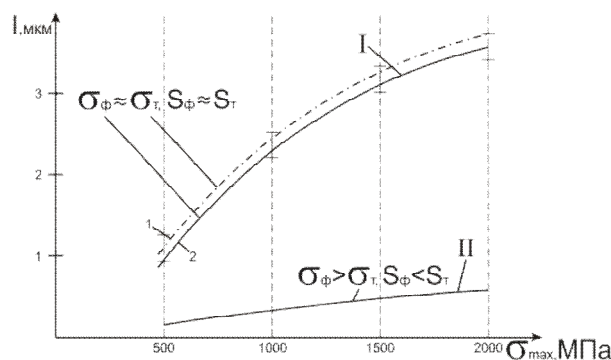


Рис. 2 – Зависимость износа I от от начальных максимальных контактных напряжений σ_{max} (1 – теоретическая, 2 – экспериментальная) при разных мгновенных фактических контактных напряжениях σ_{ϕ} относительно теоретических σ_{τ} с учетом фактической площади контакта S_{ϕ} и теоретической S_{τ} . Скорость скольжения 0,3 м/с

На рис. 2 представлены изменения износа от осевой нагрузки модельной трибосистемы скольжения при реализации постоянного (I) и подвижного контакта (II). В первом случае фактическая мгновенная площадь контакта приблизительно соответствует теоретической и сам контакт при вращении модельного вала практически не нарушается.

Представленная зависимость (I) соответствует традиционным представлениям об увеличении износа с ростом контактных напряжений (пунктир 1). Однако при подвижном контакте, вызванном осевы-

ми отклонениями поверхности образующей цилиндр модельного вала, фактическая площадь контакта при постоянной нагрузке существенно (в разы) меньше теоретической. Следовательно, мгновенные напряжения поверхностей – больше расчетных, что объясняется осевой подвижностью контактирующих участков в пределах контурной площади. При этом интенсивность изнашивания существенно уменьшается (II). После реализации полного контакта на приборе АСК-01, когда мгновенная площадь контакта близка к теоретической и фактические контактные напряжения существенно меньше, чем в предыдущем случае, интенсивность изнашивания при прочих равных условиях нагружения возрастала, несмотря на меньшие значения фактических контактных напряжений, обеспечиваемых системой самоцентрирования (рис. 1, а). Увеличение износостойкости при повышении мгновенных контактных напряжений (рис. 2, II) можно объяснить динамическими процессами в граничных слоях, а именно, их торцевыми микроперетеканиями из реверсивно смещающейся конфузурной области в диффузную в осевом направлении. Эта закономерность справедлива для масел различных классов и особенно ярко проявляется в синтетических маслах (ИПМ-10).

Рабочая поверхность трения в контактной диффузорной области характеризуются признаками адгезии (вырывы, каверны, кратеры, рис. 3, а), которые всегда отсутствуют в конфузурной области. Профилограммы дорожек износа (рис. 3, б) носят явно асимметричный характер относительно оси пересечения максимальной глубины профиля, перпендикулярной плоской поверхности. Симметрия профилей (рис. 3, б) нарушается вследствие адгезионного разрушения поверхности подшипника в диффузорной области (ДО) контакта. Адгезионное взаимодействие поверхностей в диффузорной области трибоконтакта может быть вызвано понижением в граничных слоях давления ниже давления окружающей среды. Такое разрежение в граничных слоях приводит к их десорбции и дополнительному сжатию поверхностей, инициируя их схватывание.

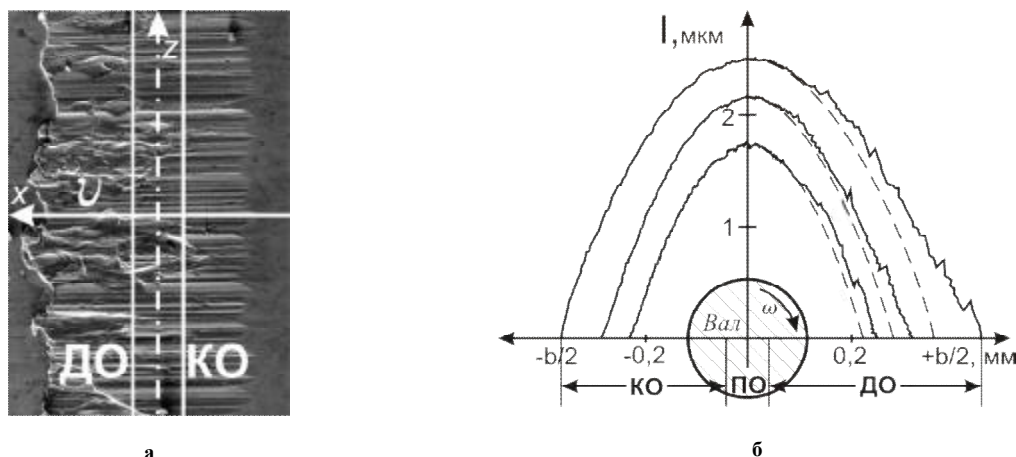


Рис. 3 – Адгезионное взаимодействие материалов поверхностей в диффузорной области (а) и асимметрия профилей изношенных дорожек скольжения (б)

На рис. 3, б показана фактическая асимметрия профилограмм дорожек скольжения, образованных на поверхности модельного подшипника после трения теоретически симметричного линейного трибоконтакта. Нарушение симметрии связано с образованием адгезионных локальных взаимодействий, показанных на рис.3, б в виде всплесков величины износа в диффузорной области контакта.

Продукты изнашивания в виде высокодисперсного порошка располагались вокруг дорожки трения определённым образом (рис. 4), отражая траектории их движения.

Планарная картина осаждения указывает на их упорядоченное движение: большинство частиц при этом скапливалось в области входа вала в контакт, а по торцам частицы износа оседали симметрично оси направления скольжения. Такое распределение продуктов износа свидетельствует об их упорядоченном движении из области входа вала в контакт в область выхода. Линии тока граничных слоёв с микрочастицами износа, показанные на рис. 4, отражают микротечения слоёв. Обращает на себя внимание практическое отсутствие продуктов изнашивания в диффузорной области выхода вала из контакта. Анализ такого распределения продуктов изнашивания в околоконтактной области свидетельствует о возникновении при трении в условиях граничной смазки определённых течений граничных слоёв, проявляющихся в оседании продуктов износа по определённым траекториям. В конфузурной области контакта происходит вынос частиц износа возвратными течениями на достаточно большое расстояние от него. При этом по краям контакта наблюдается движение продуктов изнашивания в область выхода вала из контакта, что свидетельствует об их всасывании. Возможные линии токов граничных слоёв набегающих с поверхностью 1 и возникающих встречных течений 3, направленных обратно движению вала, представлены стрелками (рис. 4).

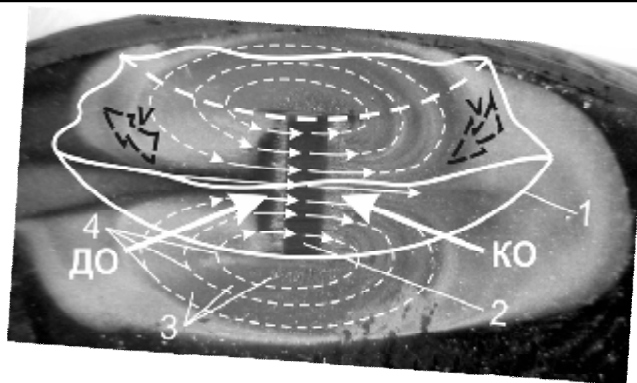


Рис. 4 – Распределение продуктов изнашивания:
 1 – контур модельного вала, скользящего в направлении V ; 2 – дорожка трения;
 3 – продукты износа; 4 – траектории течений

Кроме того, наблюдается следующее: при кратковременном трении скольжения полированных поверхностей основным признаком действия адгезионной составляющей силы трения – изнашивание – практически отсутствует, а коэффициент трения достигает значений 0,15. Исходя из адгезивно-деформационной теории, адгезионная составляющая силы трения в сто раз больше других слагаемых. То есть, представление адгезионной составляющей макросилы трения в виде превалирующей (99 % от всех потерь на трение в условиях граничной смазки) вызывает сомнение. Следовательно, что, помимо известных адгезионной и деформационной составляющих силы трения, в условиях граничной смазки в контакте возникают процессы, приводящие к дополнительному сопротивлению движения вала, вызванные, вероятно, динамическими процессами в граничных слоях.

На рис. 5 представлены области локализации адгезионного повреждения модельного подшипника. Видно, что в диффузорной области перед кромкой выхода вала из контакта происходят локальные вырывы материала в случайных местах. В том же сечении, но в конфузорной области (перед кромкой входа вала в контакт), наблюдается штриховое прерванное микрорезание поверхности частицей, ранее вырванной из подшипника в диффузорной области. Следовательно, в диффузорной области происходит первичное адгезионное взаимодействие поверхностей, после чего происходит образование продуктов адгезионного износа по следующему механизму. Закрепившиеся на поверхности вала окисленные частицы износа адгезионного происхождения, попадая в конфузорную область, осуществляют микрорезание поверхности подшипника, образуя на ней равномерные риски в направлении скольжения (рис. 5 а, б). Скалывание вершин ранее образованных адгезионных «наростов» в области входа вала в контакт приводит к образованию частиц износа, о чем свидетельствует штриховое царапание рабочей поверхности в конфузорной области (рис. 5, в). Возникновение адгезионных узлов схватывания происходит перед кромкой выхода вала из контакта и на некотором расстоянии от нее в диффузорной области.

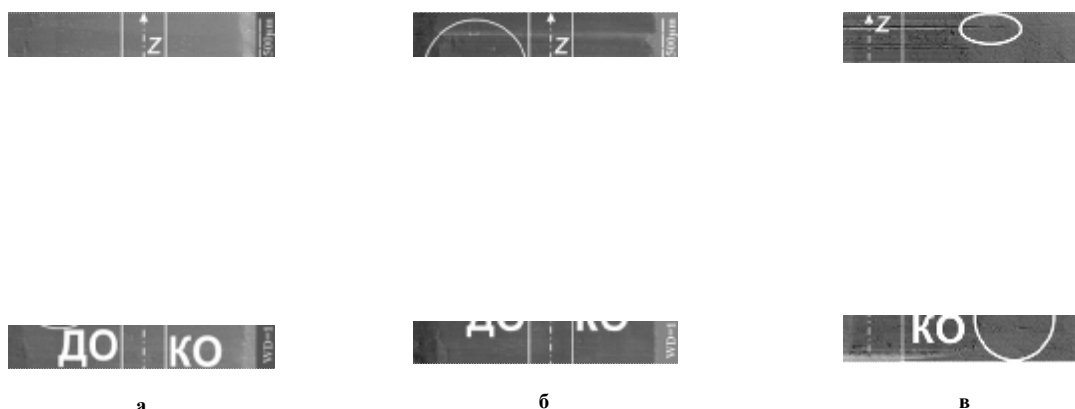


Рис. 5 – Локализация адгезионного разрушения поверхности модельного подшипника в диффузорной области (ДО) контакта в направлении v после трения скольжения по нему модельного вала (а, б) и штриховое микрорезание предконтактной конфузорной области (КО) (в)

Кроме того, наблюдается противоречие: при кратковременном трении скольжения полированных поверхностей основным признаком действия адгезионной составляющей силы трения – изнашивание – практически отсутствует, а коэффициент трения достигает значений 0,15, где, исходя из молекулярно-

деформационной теории, её адгезионная составляющая в сто раз больше других слагаемых. То есть представление адгезионной составляющей макросилы трения в виде превалирующей (99 % от всех потерь на трение в условиях граничной смазки) [7] вызывает сомнение.

Полученные результаты свидетельствуют о разнополярности процессов в конфузорной и диффузорной областях относительно середины контакта модельной трибосистемы скольжения в условиях граничной смазки, что требует экспериментального подтверждения на специальном лабораторном оборудовании с возможностью визуальных наблюдений и зондирования давления в граничных слоях прямыми измерениями путем сканирования в динамике.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выдвинуть гипотезу о протекании в граничных слоях трибоконтакта скольжения двух разнополярных процессов в граничных смазочных слоях, которая заключается в следующем. Процесс трения скольжения трибосистемы с линейным контактом в направлении движения вала (рис. 6, 7) представляется, как последовательность динамических деформационных процессов в граничных слоях:

- этап начала формирования контакта (рис. 6, 7, область 1), когда при малых нагрузках в контакт вступают лишь вершины шероховатостей, образуя дискретные площадки контакта (по Крагельскому И.В.);

- этап формирования замкнутых полостей впадин (рис.6, 7, область 2). При увеличении осевой нагрузки за счет упругих деформаций поверхностей площадь контактирующих вершин возрастает с образованием замкнутых полостей со смазкой – «резервуары» (по Боудену Ф.);

- этап сжатия возникающих замкнутых полостей (рис. 6, 7, область 3). При дальнейшем повышении контактной нагрузки смазка выдавливается из замкнутых полостей впадин в соседние полости и через них – наружу;

- этап разрежения (рис. 6, 7, область 4). После достижения максимальной упругой деформации контурно-замкнутых вершин напряжения в них уменьшаются, они упруго релаксируют, увеличивая объем «резервуаров» с остатками смазки. Так как поступлению смазки из среды в микрообъемы резервуаров препятствуют расположенные вокруг них такие же многочисленные резервуары, то в них возникает разрежение;

- этап заполнения разреженных замкнутых полостей впадин (рис. 6, 7, область 5). Этот этап носит взрывной характер, когда сильно разреженные фрагменты смазки во впадинах выходят в среду с атмосферным давлением за доли микросекунд.

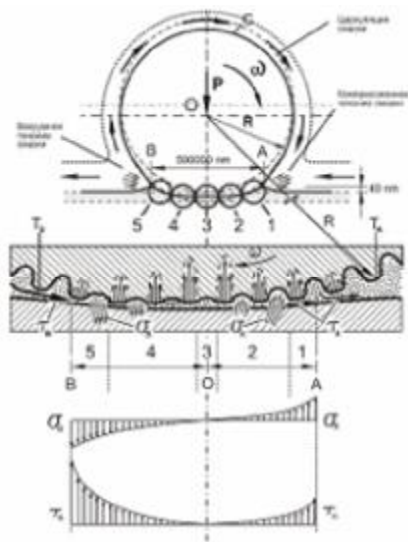


Рис. 6 – Схема образования полостей разрежения в диффузорной и сжатия – в конфузорной областях, возникновения вторичных течений, эпюры распределения нормальных σ и тангенциальных τ давлений в граничных слоях:

- 1 – область образования замкнутых общих для поверхностей полостей;
- 2 – область сжатия замкнутых полостей впадин и экструзии смазки;
- 3 – область максимального сжатия впадин и экструзии смазки;
- 4 – область разрежения;
- 5 – область заполнения полостей впадин смазкой у выхода вала из контакта

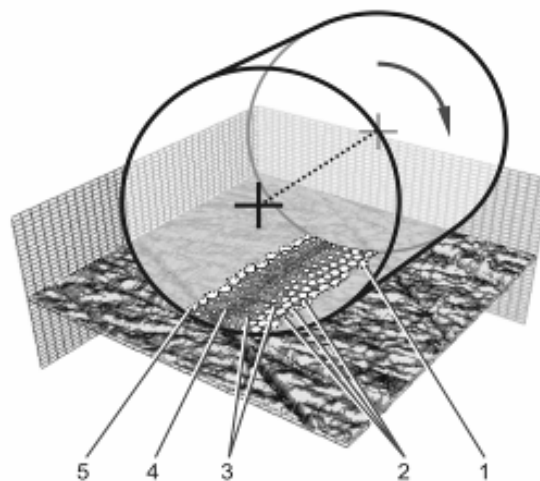


Рис. 7 – Схема образования общих для поверхностей полостей с граничными слоями, их сжатия в конфузорной и разрежения – в диффузорной областях контакта:

- 1 – область образования общих для поверхностей замкнутых полостей впадин - «резервуаров» со смазкой;
- 2 – область сжатия замкнутых полостей впадин и экструзии смазки;
- 3 – область максимального сжатия замкнутых полостей впадин;
- 4 – область разрежения полостей впадин;
- 5 – область заполнения разреженных полостей смазкой под давлением окружающей среды

На этапах разрежения смазки в областях 4 и 5 (рис. 6, 7), то есть в диффузорной части контакта наиболее вероятна десорбция граничных слоев, трение полусухих поверхностей, их адгезия с последующим микрорезанием в конфузорной области контакта, что согласуется с полученными закономерностями.

Такой десорбционно-адгезионный механизм изнашивания и образования продуктов износа подтверждается отсутствием признаков адгезии поверхностей в конфузорной области и упорядоченным распределением продуктов износа в околоконтактной зоне преимущественно в конфузорной области контакта (шириной 0,1 мм) на достаточно большом (2 мм) удалении от него (рис. 5). Адгезионное взаимодействие поверхностей происходит в диффузорной области трибоконтакта и может быть вызвано понижением в граничных слоях давления ниже давления окружающей среды, что с одной стороны приводит к дополнительному сжатию поверхностей, а с другой – создаёт условия для квазисухого трения, инициирующего адгезионное схватывание поверхностей. Упорядоченное распределение продуктов изнашивания (рис. 4) в сочетании с асимметрией профилей изношенных поверхностей (рис. 3, б) также может быть результатом процессов микротечений граничных слоев и соответствующих градиентов давления в них.

Полученные экспериментальные закономерности подтверждают предложенную гипотезу о взаимосвязи процессов адгезионного изнашивания поверхностей трения с возникающими динамическими процессами в граничных слоях смазки.

На основе полученных экспериментальных эффектов, которые не имеют своего однозначного объяснения с позиций известных теорий трибологии и наблюдений за течениями, возникающими в контактной области, выдвинута гипотеза о протекании в трибоконтакте скольжения двух разнознаковых процессов в граничных смазочных слоях, что представлено на рис. 6 и 7.

Выводы

Повышение износостойкости трибосистем с ростом мгновенных контактных напряжений, асимметрия изношенных дорожек скольжения, возникновение первичных узлов адгезионного взаимодействия в ДО и оседание продуктов изнашивания в области, близкой к КО, может быть результатом возникновения контактных микротечений граничных слоев.

Выдвинута гипотеза о наличии двух разнополярных процессов сжатия и растяжения фрагментов смазки в трибосистеме скольжения с линейным контактом, инициированных микротечениями граничных слоев.

Установлено, что первичное адгезионное взаимодействие поверхностей трения возникает в диффузорной области трибоконтакта. Предложен десорбционно-адгезионный механизм изнашивания при трении в условиях граничной смазки, заключающийся в адгезии поверхностей в диффузорной области (ДО) контакта, вырывом и поступлении вместе с валом первичных частиц износа в конфузорную область (КО), которые осуществляют микрорезание поверхности в этой области с последующим скалыванием вершин адгезионных «наростов», переходящих в продукты износа.

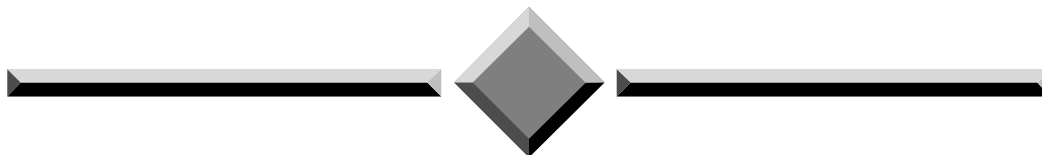
Автор выражает благодарность профессору Аксенову А.Ф. за постоянный интерес к работе и участие в обсуждении результатов, а также коллективу лаборатории нанотриботехнологий НДЧ НАУ за участие в экспериментальных исследованиях.

Литература

1. Гидродинамическая теория смазки / Под редакцией и с доп. статьями проф. Лейбензона Л.В.- Государственное технико-теоретическое издательство. – М. – Л., 1934. – 575 с.
2. Петров Н.П. Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости. Инж. журн., т. 27, №1, №2, 227; №3, 337; №4, 535, 1883. Отдельное издание, СПб, 1881. – 212 с.
3. Петрусевич А.И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. – Известия АН СССР, ОТН, 1951, №2,- С.209-216.
4. Никитин А.К., Ахвердиев К.С., Остроумов Б.И. Гидродинамическая теория смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
5. Floberg L. Sub-Cavity Pressure and Number of Oil Streamers in Cavitation Regions With Special Reference to the Infinite // Journal Bearing Mech. Engng.: Acta Polytechnica Scandinavica. – 1968. – Ser. №37.
6. Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А. Мазильна дія оливи в умовах еластогідродинамічного мащення. – К.: Інформавтодор, 2009. – 184 с.

7. Крагельский И. В. Основы расчетов на тертя и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
8. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М. : Машиностроение, 1968. – 543 с.
9. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – М. ; К : Машгиз, 1950. – 168 с.
10. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости : монография / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницкий : ХНУ, 2006. – 278 с.
11. Запорожец В.В. Ремонт летательных аппаратов. Ученик для вузов гражданской авиации / А.Я.Алябьев, Ю.М. Болдырев, В.В. Запорожец и др.; под ред. Н.Л.Голего. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1984. – 422 с.
12. Дмитриченко Н.Ф. Эластогидродинамика. – Львов: Изд-во Национального университета «Львовская политехника», 2000. – 224 с.
13. Стельмах О.У. Компресійно-вакуумна складова сили тертя в умовах граничного змащування // Вісник НАУ. – 2008. – №4. – С. 50–57.
14. Стельмах А.У. Способ определения противоизносных и (или) антифрикционных свойств трибосистемы с одним линейным контактом постоянной протяженности и устройство для его осуществления / Кияшко С.Н., Стельмах А.У., Костюник Р.Е., Терновая Т.В., Сидоренко А.Ю. // Патент РФ на изобретение № 2279660. Заявлено 30.09.04; опубл. 10.07.06. Бюл. № 19.– 10 с.
15. Способ дифференциально-фазовой профилометрии и/или профилографии и устройство для его реализации / Кияшко С.Н., Смирнов Е.Н., Ильченко Л.Н., Коленов С.А., Стельмах А.У. // Патент на изобретение № 2001116525. – 2001.

Надійшла 18.01.2012



ЧИТАЙТЕ
журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети
INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>